

Análisis estructural de cúpulas tabicadas: la cúpula interior de la Basílica de la Virgen de los Desamparados en Valencia

SANTIAGO HUERTA FERNÁNDEZ

Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

La cúpula oval interior de la Basílica de los Desamparados, terminada en 1701, es una de las cúpulas de fábrica más esbeltas que se han construido nunca. Es una cúpula tabicada de 80 mm de espesor y una luz mayor de 18,5 m. Se construyó sin cimbra, con enorme ingenio y economía de medios. Está en contacto con la cúpula original exterior sólo en su mitad inferior. En la mitad superior hay 126 hierros que conectan ambas cúpulas. Esta última disposición es única y fue descubierta en los años 1990 por Bosch Reig. El carácter extraordinario de la cúpula interior ha dado lugar a diferentes interpretaciones sobre su funcionamiento estructural y seguridad. El presente trabajo describe la construcción y trata de explicar la seguridad de la cúpula que ha permanecido en pie trescientos años sin necesidad de reparaciones o refuerzos.

ABSTRACT

The oval dome inside the Basilica of the Homeless of Valencia, built in 1801, is one of the more slender masonry domes have been built. It is a tile dome section of 80 mm and a light greater than 18,5 m. Was built without formwork, with great intelligence and economy of means. Is in contact with the original exterior dome only in its lower half. In the upper half there are 126 irons that connect the two domes. This union with iron is unique and was discovered in 1990 by Bosch Reig. The extraordinary character of the inner dome has led to different interpretations of its structural safety. This work detail construction and tries to explain the safety of the dome that has survived hundred years without repairs or reinforcements.

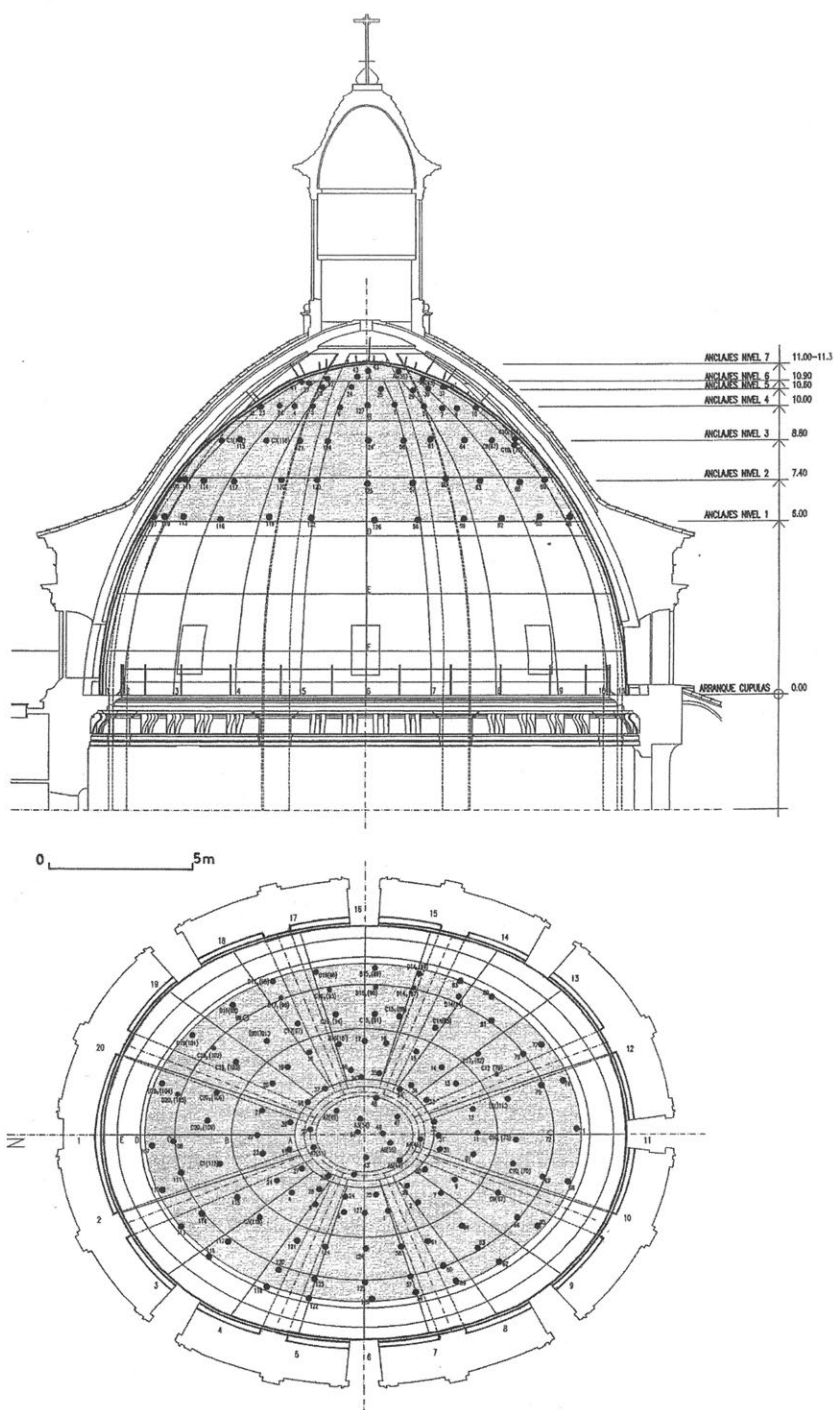


Figura 1. Planta y sección de la doble cúpula de Los Desamparados. Los puntos negros indican la posición de los hierros que conectan ambas cúpulas (Bosch 2006)

La Basílica de la Virgen de los Desamparados, construida entre 1652 y 1667, es el edificio valenciano más importante del siglo XVII (Bérchez 1995). Su elemento más notable es la gran cúpula oval que en planta aparece inscrita en un trapezoide. Esta disposición fue muy popular en el Barroco y tiene su origen en los proyectos de Vignola para Sant'Andrea in Via Flaminia (1550) y Sant'Anna dei Palafranerì (1572), véase Lotz (1955). En España se construyeron varias cúpulas ovales hacia 1600 (Rodríguez G. de Ceballos 1983); la más grande es la del convento de las Recoletas Bernardas en Alcalá de Henares, 1617-1626, con ejes de 25 x 18 m, y una altura de 11 m (según levantamiento de Schubert 1908).

Treinta y tres años tras su terminación, hacia 1700, se construyó una nueva cúpula interior, encajada dentro de la original, para servir de soporte a un enorme fresco del pintor Antonio Palomino en honor de la Virgen de los Desamparados. Esta cúpula es extraordinariamente delgada y presenta algunas disposiciones que la convierten en un caso de excepcional interés en la historia de las cúpulas de fábrica.

La estructura y construcción de la Basílica de los Desamparados fue estudiada exhaustivamente en los años 1990 con vistas a elaborar posteriormente un proyecto de restauración. Los trabajos y el proyecto fueron dirigidos por el arquitecto Ignacio Bosch Reig. Algunos estudios fueron publicados en 1999 (Roig y Bosch 1999), y toda la información referente a los estudios y posterior restauración fue compilada y publicada en un libro (Bosch 2006). En este caso se dispone, por tanto, de una enorme cantidad de información sobre la estructura, construcción y forma del edificio. En lo que sigue trataremos sólo la construcción y comportamiento estructural de la doble cúpula de la Basílica.



Figura 2 Fresco de Antonio Palomino en la Basílica de los Desamparados (Bérchez 1995)

La cúpula exterior

La Basílica original, cuando se terminó en 1667, poseía una única cúpula apuntada coronada por una linterna, figura 1. La cúpula es de planta oval con ejes de 19 por 15 m, y una altura de 12,70 m, esto es, muy aproximadamente 2/3 del eje mayor. La cúpula tiene un pie de espesor, 310 mm, y está construida con ladrillos de 310x14x40 mm. Posee ocho nervios que convergen en el óculo de la base de la linterna. Los nervios se proyectan sólo medio pie hacia el interior (150 mm). Cúpula y nervios están enlucidos de yeso formando esgrafiados y decoraciones geométricas. Los nervios tienen un ancho que varía entre 900 mm en la base y 450 mm en la co-

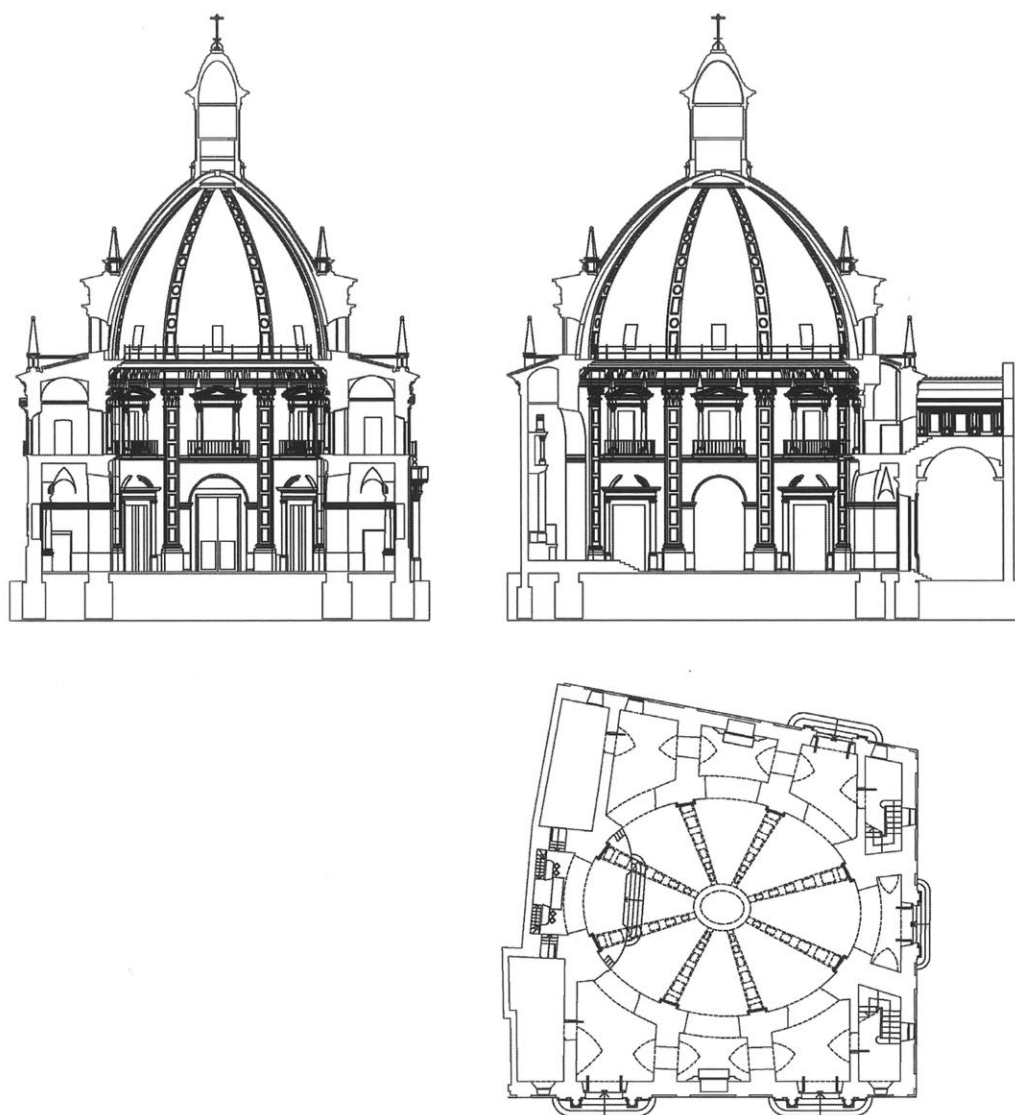


Figura 3. Secciones y planta de la Basílica original terminada en 1667 (Bosch 2006)

ronación. En la figura 4 puede verse la construcción de la cúpula (nótese, que el trasdós de la cúpula exterior está trasdosado a su vez por otra hoja sobre hiladas de ladrillo, dejando una cámara de aire, que recibe las tejas).

En la base, la proporción de los ejes del óvalo es muy aproximadamente $5/4$ (ver figuras 1 y 3). Probablemente, su forma general se obtuvo trazando arcos apuntados que, teniendo tangente vertical en el arranque,

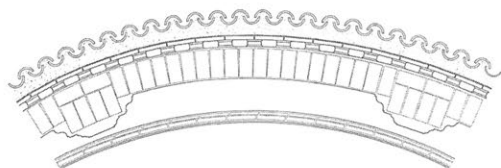


Figura 4. Sección a media altura, mostrando la construcción de la doble cúpula (Bosch 2006)

pasan por el eje vertical de la cúpula; de esta manera se podrían haber obtenido las montañas de las cimbras situadas bajos los nervios. Los radios de las dos secciones principales son 15 m y 12,5 m, figuras 3 (a) y (b). El cociente radio/espesor está comprendido, pues, entre 40 y 50 para la zona entre nervios de un pie de espesor. Este cociente es similar al de la cúpula interior de San Pablo de Londres (Heyman 2011).

La cúpula interior

Hacia 1700 se construyó la cúpula interior como soporte para el gran fresco de Palomino (figura 2). El fresco se terminó en 1701. La construcción de la bóveda y la pintura del fresco llevó apenas un año y medio.

En los siglos XVII y XVIII no era infrecuente modernizar, esto es “barroquizar”, antiguas iglesias, construyendo bóvedas tabicadas que ocultaban las bóvedas góticas originales. En Valencia se hizo poco antes en la iglesia de los Santos Juanes, donde se construyó una gran bóveda de cañón con lunetos por debajo de las bóvedas góticas de la nave (Marín 2011).

La cúpula interior es tabicada, y está constituida por dos capas de rasillas con espesores de 35 mm la cáscara interior y 25 mm el trasdosado exterior (figuras 1 y 4).

En la hoja exterior las rasillas están dispuestas matando las juntas de la interior; es evidente que los albañiles trabajaron rápido y no consideraron necesario rellenar con cuidado las juntas entre las rasillas de esta hoja (figura 5a). No es un defecto, era una práctica frecuente en el doblado de las cúpulas tabicadas. Puede observarse, por ejemplo, en la cúpula sobre el crucero de la iglesia de la Peregrina en Sahagún (Huerta 2010), figura 5b, y también en el trasdós de la bóveda de los Santos Juanes (Marín 2011).

Las rasillas están recibidas con yeso que gracias a su rápido fraguado permite la construcción sin cimbra. El intradós fue enlucido



(a)



(b)

Figura 5. Trasdósado de cúpulas tabicadas: (a) cúpula interior de los Desamparados (Bosch 2006); (b) cúpula de la Peregrina (Huerta 2010)

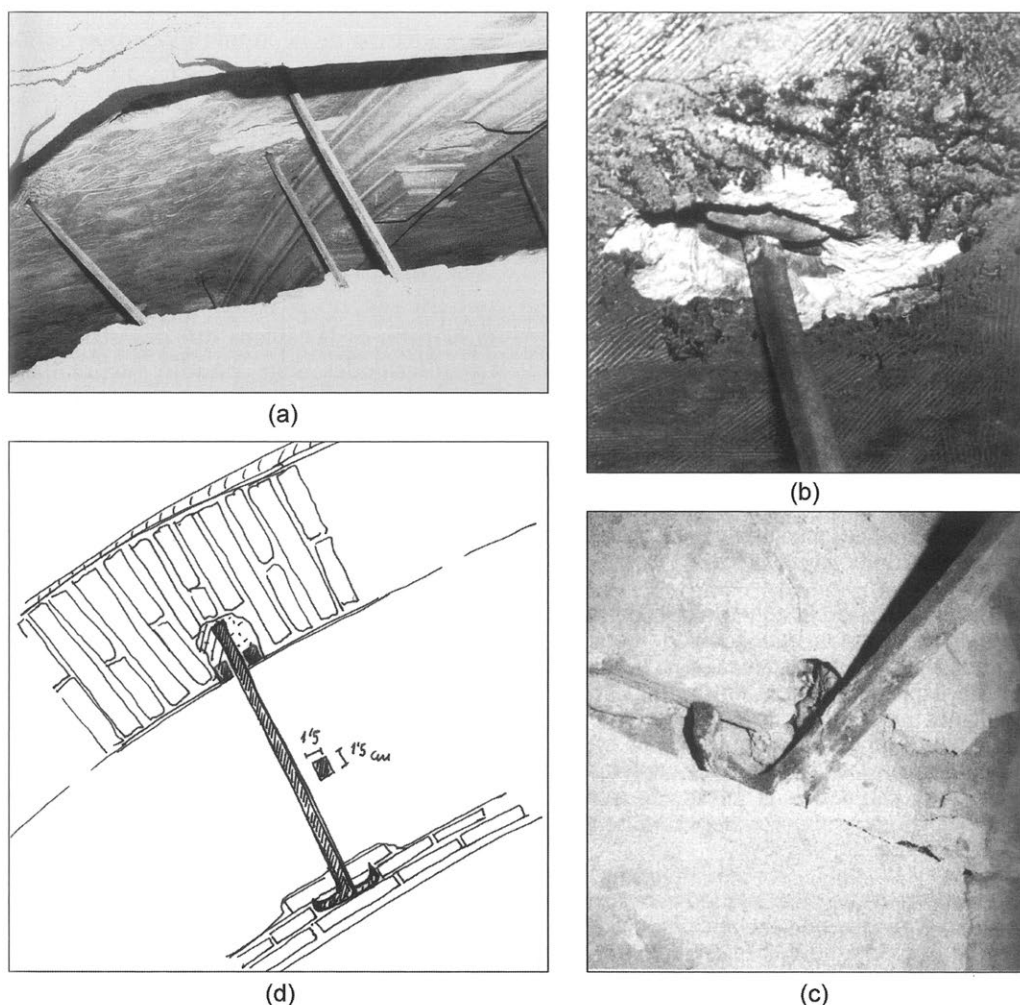


Figura 6. Hierros de conexión entre las cúpulas en la parte superior: (a) vista general; (b) anclaje en el intradós de la cúpula exterior; (c) anclaje con el trasdós de la cúpula interior (Bosch 2006); (d) esquema de anclaje de un hierro tipo (dibujo del autor)

con una capa de 20 mm para recibir el fresco. El espesor total es, pues, de 80 mm. Como veremos, la parte inferior de la cúpula discurre en paralelo con la exterior, por lo que los radios de curvatura en esa zona son casi iguales. El cociente radio/espesor crece ahora a 150-180, del orden del mismo cociente para la cáscara de un huevo de gallina. La su-

perficie interior es de 530 m² y el peso total de la cúpula interior es de unas 80 toneladas.

La cúpula arranca de la imposta de la cúpula original. La cáscara se construyó concéntrica con el intradós de la cúpula exterior, y apoyando contra los nervios a los que previamente se les había eliminado el revestimiento decorativo de yeso para

asegurar un buen apoyo y facilitar la adherencia del yeso durante la construcción. El espacio entre ambas cúpulas en la parte inferior es de poco más de medio pie, unos 160 mm.

Hacia la mitad de la altura de la cúpula, la cáscara interior se separa de los nervios (figs. 3 y 4) y cierra formando un ovoide irregular (ver fig. 7 más adelante). En la mitad superior las dos cúpulas están conectadas mediante 126 barras de hierro de 15×15 mm² de sección. Las barras están empotradas en el intradós de la cúpula exterior y presentan en el otro extremo una terminación en T para definir la posición de la primera cáscara de rasillas y, posteriormente, permitir su anclaje. La disposición es como sigue: el hierro permite situar la posición de las rasillas de la primera hoja; se aparejan en derredor las rasillas del doblado; finalmente, se disponen dos ladrillos lateralmente al hierro, recibidos con yeso, figura 6.

Los hierros se pueden ver desde el trasdós de la cúpula interior, ya que es posible acceder a través de un agujero hecho en la coronación de la cáscara exterior. No obstante, su localización precisa (figura 1) se realizó mediante detectores de metales, desde el interior (Bosch 2006). Su disposición es bastante regular: forman siete anillos, más o menos paralelos, y espaciados alrededor de 1,5-1,70 m a lo largo de los meridianos. Esta disposición de hierros conectando dos cúpulas es, por lo que sabemos, única, y fue descubierta por Bosch y su equipo durante los estudios preliminares a la restauración (Bosch 1999). El artificio, completamente inusual, dio lugar inmediatamente a preguntarse sobre su posible función.

El equipo de Bosch lo interpretó como un sistema de “tirantes” que “colgaba” la cúpula interior de la exterior. La cúpula interior fue denominada, entonces, “falsa cúpula”, una suerte de falso techo sin función estructural, mero soporte del fresco.¹ Más adelante vol-

veremos sobre este tema fundamental.

La forma de la cúpula interior se conoce con bastante precisión gracias a un levantamiento fotogramétrico que localizaba 900 puntos del intradós. Se pudieron dibujar con precisión las dos secciones principales, así como suponer superficies simples para su empleo en un análisis de elementos finitos (ver Bosch 1999 y 2006). Sin embargo, aparentemente, no se realizó un estudio de las curvaturas de la cáscara, que muestra visibles irregularidades. Este estudio fue realizado por el autor en el contexto del citado informe (ver nota 1) sobre la seguridad de la cúpula interior (figura 7).²

Resulta evidente que la cáscara interior discurre paralela a la exterior y se aprecia con claridad un cambio de la curvatura cuando se separa (figs. 1 y 7). Es a partir de este punto cuando aparecen los hierros de conexión. El casquete superior es un ovoide irregular rebajado, que presenta apreciables “abolladuras” (zonas de curvatura gaussiana negativa, con los dos radios principales de curvatura en lados opuestos de la superficie). La imagen resulta ciertamente alarmante para un moderno arquitecto o ingeniero que desconoce la construcción tabicada y no ha inspeccionado el trasdós de otras cúpulas tabicadas. Sin embargo, estas irregularidades son irrelevantes desde el punto de vista de la seguridad, y aparecen con frecuencia en las cúpulas tabicadas. En efecto, la curvatura gaussiana negativa proporciona *siempre* un funcionamiento en “arco” que permite transmitir las cargas (por el contrario, una curvatura gaussiana positiva hacia abajo, una convexidad, no podría ser resistida por la fábrica). Este hecho era bien conocido por los albañiles y maestros, que no daban importancia a estas distorsiones.

El autor ha podido estudiar con detalle otra cúpula tabicada oval que está sobre el crucero de la iglesia de la Peregrina en Sahagún (Huerta 2010; Huerta y Fuentes 2010), y

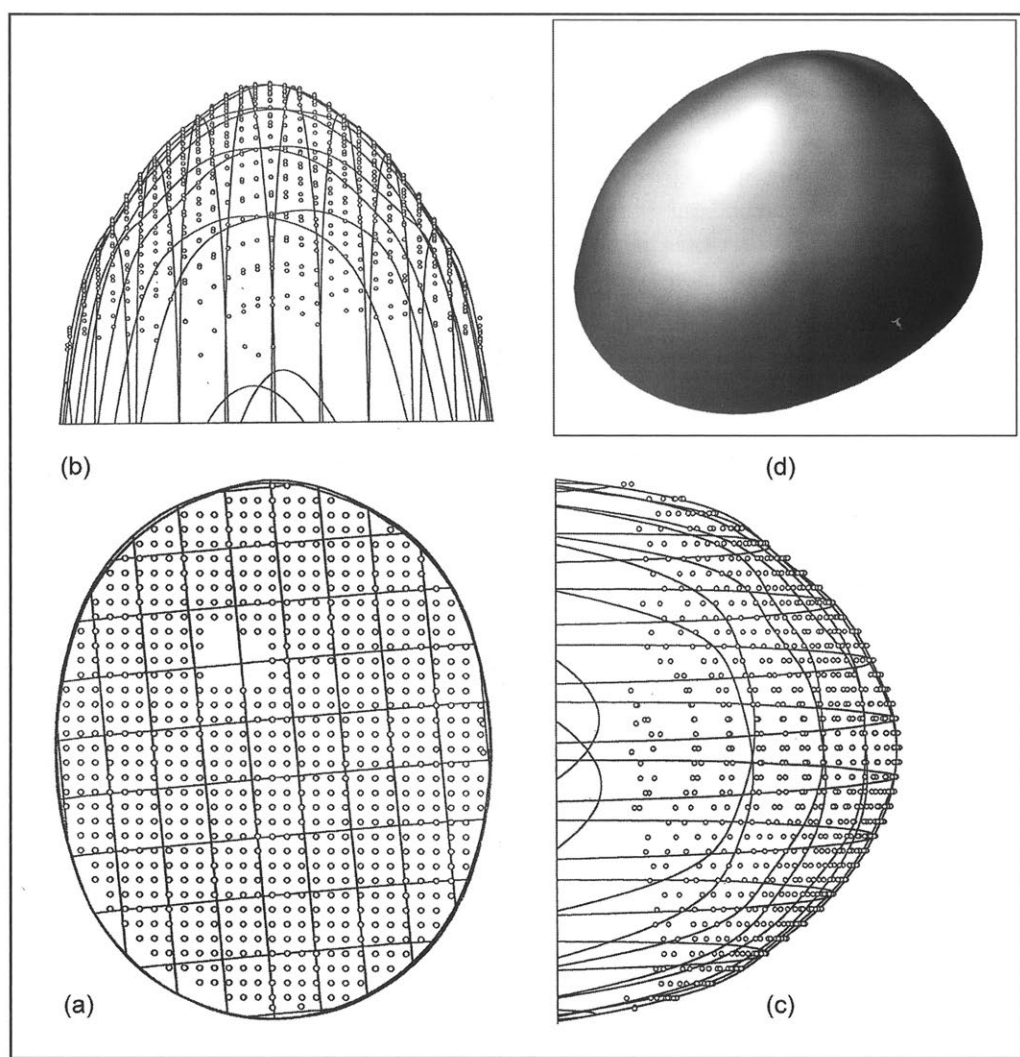


Figure 7. Superficie que contiene los puntos del levantamiento fotogramétrico. (a)-(c) Planta y secciones principales; (d) Perspectiva.

ha observado las mismas irregularidades, figura 8. Gaudí, siendo consciente del inquietante efecto de una bóveda de fábrica que parece en algunas zonas colgar hacia abajo, dispuso los paraboloides hiperbólicos con curvatura gaussiana negativa del porche de la iglesia de la colonia Güell buscando reforzar esta impresión, figura 9.

Nos enfrentamos a dos tipos de cuestiones. La primera se refiere a las técnicas de construcción de bóvedas y cúpulas tabicadas en España hacia 1700 y su relación con la forma y construcción de la cúpula de la Basílica. Los estudios de Bosch han recopilado de manera arqueológica los hechos desnudos: levantamientos, análisis y descripción de

materiales, etc. La segunda entra en el terreno de la interpretación. ¿Por qué se construyó la cúpula interior de esa forma? ¿Qué función tienen los hierros de conexión? ¿Cuelga en realidad la cúpula de 80 toneladas de los hierros? ¿Cómo se controló la forma de la cúpula durante la construcción? Finalmente: ¿Es segura la cúpula interior? Ciertamente, ha estado en pie durante 300 años pero, ¿se encontraba al borde del colapso? Las irregularidades y abolladuras, ¿son “imperfecciones” habituales de la construcción, o por el contrario el resultado de problemas inherentes de inestabilidad que a lo largo de tres siglos se han incrementado hasta llevar la cúpula al borde del colapso?

Para responder al segundo tipo de preguntas se necesitan dos marcos de referencia: el primero se refiere a la Historia de la Construcción, esto es, al conocimiento empleado en el proyecto y construcción de bóvedas y cúpulas tabicadas, en España en los siglos XVI y XVII. Este conocimiento nos permitiría tratar de pensar como lo haría un arquitecto o maestro de obras hacia 1700 y emplear su “lógica constructiva” para interpretar los hechos desnudos.

El segundo se refiere al comportamiento estructural de las bóvedas y cúpulas de fábrica, como parte de una teoría que englobe toda la arquitectura de fábrica. Se necesita una teoría de estructuras de fábrica que considere los edificios tal y como son, un conjunto de bloques, un amontonamiento de piedras y ladrillos, dispuestos de tal manera que se mantienen en el aire por las fuerzas de compresión que se generan entre ellos. Es preciso abandonar la peligrosa fantasía de imaginar que se comportan como si estuvieran hechos de hormigón armado o acero, pudiendo entonces aplicar los programas convencionales y la normativa al uso (por ejemplo, el último Código Técnico, la Norma Española del Hormigón, etc.).

La construcción de bóvedas y cúpulas tabicadas en el siglo XVII español

Las bóvedas tabicadas se han construido en España desde hace siglos. Las más antiguas están fechadas en Valencia en 1382. No obstante, Almagro (2001) ha encontrado restos de bóvedas tabicadas del siglo XII en Andalucía. Se trata, sin duda, de una técnica de construcción sin cimbra mediterránea: se encuentran estas bóvedas en Italia, Francia (Rosellón) y en diversos lugares del norte de África. Esta forma constructiva se entronca en la antiquísima tradición de construcción de bóvedas sin cimbra que se inicia en Mesopotamia o Egipto en el IV milenio a.C. (Bessenal 1984; El-Naggar 1999). En España se emplearon con profusión durante los siglos XVII y XVIII para la construcción de iglesias parroquiales y conventos.

Sobre la práctica de la construcción de este tipo de bóvedas tenemos una fuente directa: el tratado escrito por el arquitecto Fray Lorenzo de San Nicolás, *Arte y uso de arquitectura*, publicado en Madrid en 1639. Se trata de un libro extraordinario para Kubler (1957, 80). Los capítulos sobre bóvedas tienen particular interés pues Fray Lorenzo describe con gran detalle su trazado y construcción para las tres fábricas más usuales: piedra, rosca de ladrillo y tabicada. Esto distingue el tratado de la mayoría de los tratados de la época (españoles y extranjeros) que, curiosamente, apenas le dedican breves comentarios a la construcción de bóvedas (Huerta 2004).

Las cúpulas tabicadas, según dice explícitamente Fray Lorenzo, se construyen sin cimbra. La forma se controla mediante cuerdas o listones de madera, llamados “cintres”, que giran alrededor de puntos fijos. También se podían construir “formas” ligeras, esto es, arcos de camones destinados a guiar al albañil en la ejecución sin cimbra, “al aire”, pero que no soportan peso como las cimbras. A medida que la bóveda crece sobre sus arranques,

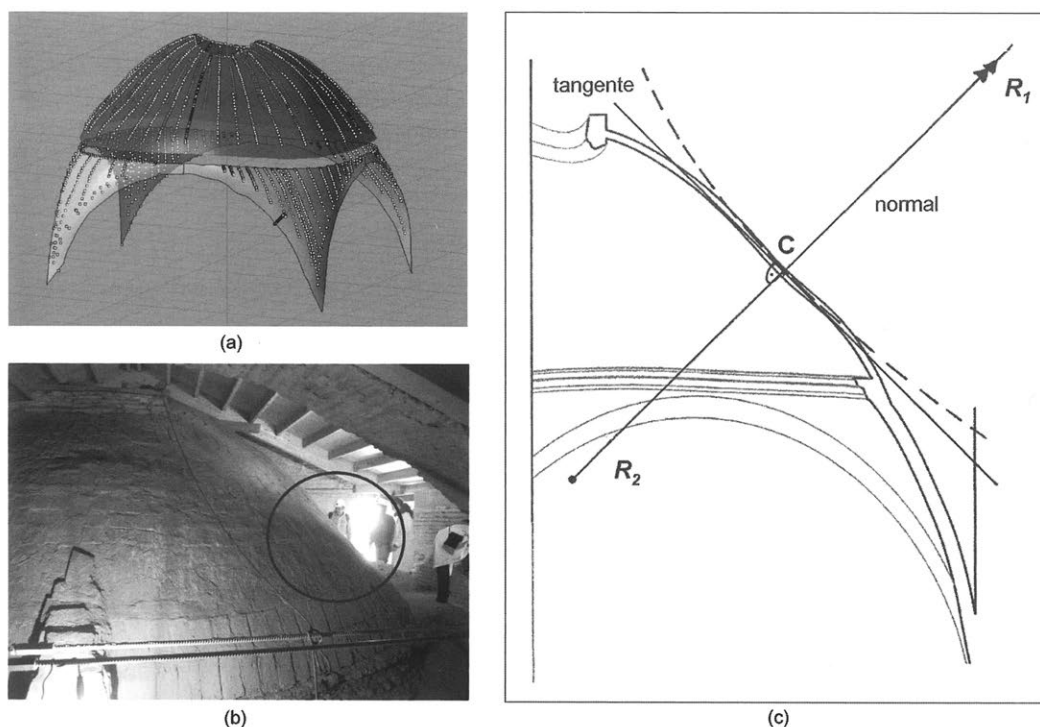


Figura 8. Geometría de la cúpula oval tabicada de la iglesia de la Peregrina en Sahagún: (a) perspectiva de la nube de puntos (A. López Mozo); (b) foto mostrando una zona con curvatura gaussiana negativa; (c) Sección de la cúpula mostrando, de forma cualitativa, los radios de curvatura en lados opuestos (Huerta 2010)

debe ser trasdosada por un relleno y/o muros transversales de contrarresto. La regla general es macizar el trasdós del primer tercio de la altura de la bóveda o cúpula, y disponer muros transversales (radiales en el caso de las cúpulas), llamados “lengüetas”, que lleguen hasta el segundo tercio de altura (Huerta 2003, 2004). Esta regla es general para todas las bóvedas (sólo en las de arista admite un trasdosado más bajo, hasta la mitad) y Fray Lorenzo insiste una y otra vez en su importancia:

“... y assi como vayas tabicando, la iras doblando y macizando las embecaduras hasta el primer tercio, y esto ha de ser en todas las bobedas, echando sus lenguetas à trechos,

que levantan el otro tercio, para que asi reciban todo el empujo ò peso de la bobeda” (San Nicolás [1639], 91v)

El caso más corriente es el de una cúpula semiesférica (media naranja) sobre pechinas, en un crucero cuadrado, y rodeada por muros formando un cubo hueco sobre el que apoya la armadura. Este es el tipo de iglesia que elige Fray Lorenzo en su tratado para explicar la aplicación de sus reglas, figura 10a. En la mayoría de los casos, al inspeccionar el trasdós se puede apreciar el macizado de relleno (resulta difícil estimar la altura) y ocho muros radiales: cuatro según las diagonales y los otros cuatro según los ejes de la nave y del crucero (fig. 10b). Sólo conocemos un

caso en que no se haya seguido la regla: la cúpula de la Peregrina presenta una forma tal que la superficie de la cúpula está en continuidad con la de las pechinas. Los arranques de la cúpula sobre la imposta son inclinados y toda la cúpula trabaja confortablemente a compresión sin necesidad de rellenos ni de lengüetas (fig. 8).

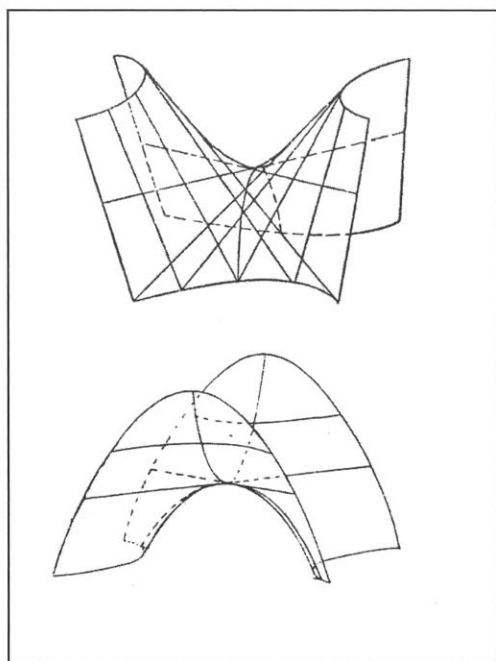
La teoría de estructuras de fábrica

La arquitectura de fábrica es esencialmente diferente de la arquitectura moderna, y el análisis estructural debe tener en cuenta esta diferencia fundamental. La teoría convencional de estructuras se desarrolló durante el siglo XIX para las modernas estructuras de barras (porticadas o trianguladas) hechas de hierro (fundido, forjado o acero) u hormigón armado. Esta teoría resulta completamente inútil a la hora de entender el comportamiento de incluso la estructura más simple, un arco de fábrica. Por supuesto, en los siglos XVIII y XIX se desarrolló una teoría de arcos y bóvedas de fábrica que tenía en cuenta la característica esencial de las fábricas: tienen que trabajar a compresión. Se desarrollaron diferentes métodos de análisis de equilibrio y colapso, que fueron usados por ingenieros y arquitectos (Heyman 1982). A finales del siglo XIX las estructuras de fábrica habían perdido su predominancia y el énfasis en el desarrollo de la teoría elástica de estructuras había barrido a la llamada entonces "antigua teoría de bóvedas". Los ingenieros intentaron, sin éxito, sustituir dicha teoría por una nueva que consideraba el material fábrica como un material continuo, homogéneo, isótropo y con constantes elásticas determinadas. Sin embargo, incluso el examen más superficial de cualquier estructura de fábrica pone en evidencia justo lo contrario: las fábricas son esencialmente discontinuas, heterogéneas, unilaterales (resisten compresiones y no tracciones) y, además, presentan agrietamientos externos (visibles) e internos

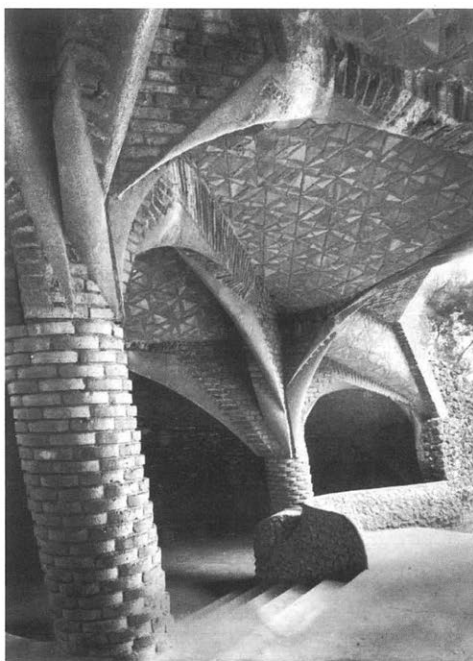
(invisibles) que son imposibles de predecir o conocer, pues se deben a pequeñas variaciones de las condiciones de contorno (Huerta 2008).

En los años 1960 el profesor Heyman demostró que el análisis de estructuras de fábrica se podía incorporar de forma rigurosa dentro del moderno Análisis Límite, también llamado plástico o a rotura (Heyman 1995, 1996, 2008). El Teorema Fundamental de la Seguridad justifica el uso de sólo dos de las tres ecuaciones estructurales, las de equilibrio y del material, no siendo necesario hacer afirmaciones dudosas de compatibilidad (en particular de las condiciones de contorno). Las consecuencias de este corolario del Teorema de la Seguridad pueden ser comprendidas por cualquiera con un conocimiento básico de la construcción de fábrica: Si es posible encontrar una distribución de fuerzas internas de compresión en equilibrio con las cargas, entonces, la estructura es "segura", no se hundirá.

La "antigua teoría de bóvedas" antes citada, se basaba en el empleo de las ecuaciones de equilibrio imponiendo la condición de que la fábrica ha de trabajar a compresión, y es, por tanto, completamente correcta. Para peso propio, que se cumpla la condición de que pueda existir un estado interno de fuerzas de compresión que equilibre las cargas, depende exclusivamente de la forma: es la geometría la que garantiza la estabilidad. Este hecho fundamental, que se escapa a muchos arquitectos e ingenieros modernos, era bien conocido por los constructores desde la antigüedad. Hay una evidencia documental abrumadora del empleo de reglas estructurales de proporción, esto es, del cálculo geométrico de las estructuras, independientemente del tamaño (por supuesto, las reglas son particulares de cada tipo estructural; no se pueden aplicar reglas góticas a bóvedas de cañón renacentistas) (Heyman, 1995, Huerta 2004). Así, pues, ya sea por el rigor científico



(a)



(b)

Figura 9 Bóvedas de fábrica con curvatura gaussiana negativa en el pórtico de la iglesia de la colonia Güell de Gaudí (foto Tomlow (1989))

de la moderna teoría de bóvedas, o a través de la experiencia de los mejores constructores, se llega al mismo tipo de afirmaciones geométricas.

Cáscaras delgadas de fábrica

La solución de equilibrio a compresión implica que las fuerzas internas deben estar contenidas dentro de la fábrica. Esta condición no determina el sistema de fuerzas en equilibrio, hay infinitos en una estructura hiperestática, pero sí limita el dominio donde se pueden encontrar las fuerzas: los límites de la fábrica definidos, por ejemplo, en arcos o bóvedas por las superficies de trasdós e intradós.

En el arco, la trayectoria de las fuerzas internas puede imaginarse de forma sencilla recurriendo a la analogía de la cadena

colgante propuesta por Hooke. En efecto, la estática de cables y arcos es la misma, y podemos pensar en arcos como cadenas invertidas. La forma de la cadena no coincide, en general, con la de los arcos usuales y, como consecuencia, el arco debe tener un espesor que permita que la cadena discurra por su interior. En un arco bien proyectado puede haber infinitas cadenas, que corresponden a las infinitas soluciones de equilibrio posibles.

En las estructuras espaciales (bóvedas, cúpulas) hay una mayor libertad a la hora de buscar soluciones de equilibrio dado que las fuerzas se pueden descomponer en tres direcciones. En particular, en las cúpulas se pueden generar fuerzas internas anulares que permiten variar la dirección de las fuerzas meridianas. Ahora no hay infinitas,

sino infinitamente muchas soluciones de equilibrio. Para llegar a soluciones concretas hay que imponer condiciones (nótese que no buscamos el “estado real”, imposible de conocer, sino un “estado posible”). Si, por ejemplo, suponemos que las tensiones anulares son cero, esto equivale a imaginar la cúpula “cortada” por planos meridianos, dividida en gajos o lunas, cuyo empuje horizontal en la clave se equilibra con el gajo opuesto (el problema se reduce al del arco). También podemos imponer la condición de que todas las fuerzas estén contenidas (sean tangentes) en la superficie media de la bóveda o cúpula. Esta es la llamada “solución de membrana” y, ahora, la bóveda o cúpula no necesita de un espesor finito para obtener una solución de equilibrio, y podría ser, en teoría, infinitamente delgada; en la práctica consideraciones constructivas y de ausencia de inestabilidad (pandeo) imponen siempre un espesor finito (Heyman 1977).

Es un hecho bien conocido que en una cúpula delgada de revolución con tangentes verticales en los arranques, para que exista un estado de membrana las fuerzas anulares deben ser de compresión en la parte superior, y de tracción en la inferior. En una cúpula semiesférica las tracciones aparecen a unos 52° de la clave, cerca de $3/5$ de la altura desde la base (el valor exacto es $\cos(51,8) = 0,62$). La media naranja puede ser muy delgada por encima de ese límite, pero a partir de ahí y hacia los arranques, el espesor debe crecer para acomodar a la superficie de empujes que, ahora, sin la ayuda de las fuerzas anulares, sigue el camino de la cadena colgante (podemos imaginar la cúpula agrietada a partir de ese punto).

Esta es la función de los rellenos y las lengüetas: proporcionar una vía de escape a (una parte de) las componentes horizontales de los empujes hacia el sistema de contrarresto. La altura recomendada por Fray Lorenzo de $2/3 = 0,66$, es mayor que la cifra

antes citada de 0,62, de manera que cumpliendo la regla se asegura que toda la cúpula está trabajando a compresión. Si la cúpula es apuntada el punto de tensión anular nula descende, y, de hecho, es posible construir cúpulas con arranques inclinados, que no presentan en ningún punto tensiones anulares de tracción. Se puede, incluso, proyectar la cúpula con una forma tal que todas las fuerzas meridianas sean de compresión y las anulares cero (sería el equivalente espacial de la cadena colgante; es un problema clásico de la teoría de la membrana). Este es el caso de la cúpula de interior de San Pablo de Londres proyectada por Hooke y Wren con la forma de una parábola cúbica, una muy buena aproximación a la forma exacta (Heyman 1998, 2011). También sucede en la cúpula de la Peregrina (fig. 8, más arriba), donde el maestro de obras supo proyectar un ovoide trabajando completamente a compresión y comprendiendo también la superficie de las pechinas (Huerta 2010). El arquitecto Rafael Guastavino Expósito (hijo de Rafael Guastavino Moreno (ver Huerta (2001), Ochsendorf (2010))) también proyectó cúpulas sobre tambores de paredes inclinadas en la primera mitad del siglo XX (Huerta 2003).

La cúpula interior de los

Desamparados: una interpretación

El maestro de obras o arquitecto que proyectó y construyó la cúpula interior de la Basílica de los Desamparados, siguió al pie de la letra los preceptos y reglas de Fray Lorenzo que, como se ha visto, son enteramente correctos dentro del marco de la moderna teoría de estructuras de fábrica. La mitad inferior se construyó arrancando de la imposta en hiladas concéntricas que apoyaban contra los nervios de resalto de la cúpula exterior, a los que previamente se había picado las yeserías. Los citados nervios funcionan como los rellenos y lengüetas prescritos por

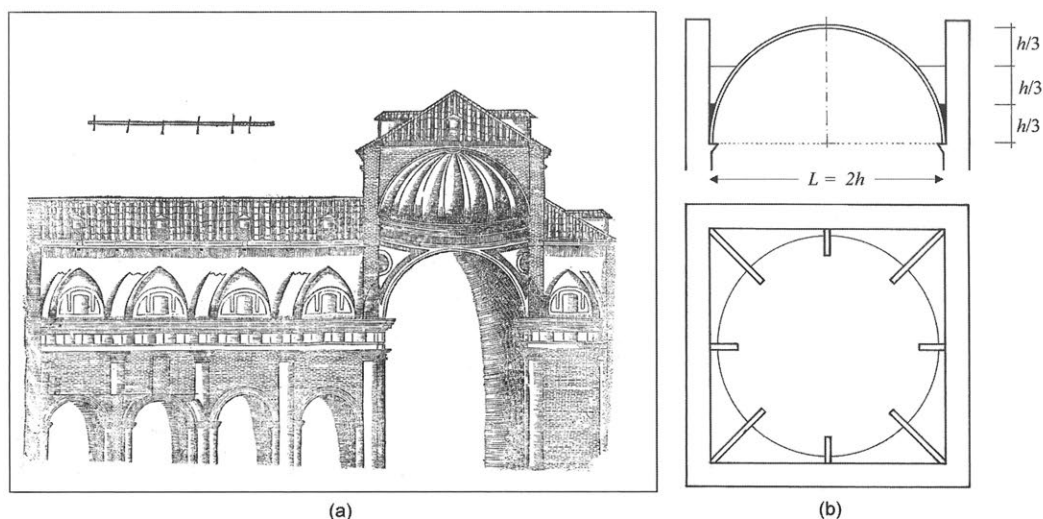


Figura 10 (a) Sección de iglesia con cúpula tabicada sobre el crucero (San Nicolás [1639]); (b) altura del relleno y de los muros de estribo o lengüetas, según Fray Lorenzo

Fray Lorenzo. La pequeña distancia entre ambas cúpulas permitió controlar la forma con facilidad.

La construcción prosiguió de esta manera hasta unos 5 m de altura, algo menos de la mitad de la altura total de la cúpula (10,5 m). Después, hay un cambio brusco de curvatura (fig. 7) y la cáscara interior se separa para adoptar la forma de un ovoide, más adecuada para el fresco que un remate apuntado.

En este momento surgen dos problemas: en primer lugar, hay que controlar la forma de la cáscara; en segundo lugar, a medida que la cáscara se inclina aparece el peligro de un colapso hacia adentro. Sin duda, una cúpula de espesor suficiente puede tener un óculo y ser estable; de hecho, las cúpulas de revolución se pueden construir sin ningún apoyo auxiliar. Pero en el caso de cúpulas ovales, si el óculo no tiene la forma adecuada y el espesor suficiente, puede que no sea posible

acomodar un estado de compresiones en equilibrio en su interior, pudiendo aparecer flexiones que la fábrica es incapaz de resistir.

Este es el caso de la cúpula interior donde las secciones horizontales (curvas de nivel) presentan formas irregulares, con cambios de curvatura bruscos. La delgada cáscara habría tenido problemas para resistir los esfuerzos en el borde abierto de los sucesivos óculos hasta su cierre completo.

El método empleado para construir la mitad superior resuelve de forma enormemente ingeniosa ambos problemas. Por hiladas horizontales, se empotraron en la cáscara exterior barras de hierro de la misma longitud rematadas en "T" (ver fig. 6, más arriba). Las cabezas de las barras definen físicamente una curva paralela a la sección de la cúpula exterior a esa altura. Los albañiles las usan de guía durante la construcción. Por otra parte, anclan la delgada cáscara a las cabezas de las

barras, evitando los problemas de flexión e inestabilidad antes descritos.

Las barras aumentan de longitud e inclinación a medida que se separan las dos cúpulas. Sin duda su longitud se calculó a partir de un dibujo a escala natural de una sección de la cúpula exterior (una montea). Este dibujo pudo haberse trazado en el suelo de la Basílica (de hecho, basta con trazar media sección). El maestro dibujaría "a ojo" el perfil de la parte superior de la cáscara interior, y situaría las alturas de las distintas hiladas horizontales de hierros. Trazaría los hierros y, sobre el suelo, mediría sus longitudes para encargar su ejecución al herrero. Por supuesto, lo anterior es una mera hipótesis, pero está bien documentado desde la antigüedad el uso de monteas a tamaño natural para calcular las dimensiones de los elementos de las bóvedas y armaduras.

Cerrada la cúpula, ésta funciona como cualquier cúpula tabicada, con un casquete superior trabajando a compresión en un estado muy aproximadamente de membrana, y con la parte inferior contrarrestada por rellenos y lengüetas. Estos elementos sirven como "escape" a las fuerzas horizontales y garantizan que también la parte inferior está transmitiendo cargas a compresión.

La vista alarmante de la sección de las figuras 1 y 4 donde, en apariencia, la cúpula interior es una delgada cáscara que "flota" independiente y sin conexión alguna con la robusta cúpula exterior, se ha redibujado en la figura 11. Ahora, el dibujo manifiesta el sólido contrarresto de la parte inferior, al haber cortado por los nervios, y presenta un aspecto mucho más tranquilizador.

Conclusiones

La cúpula interior de la Basílica de los Desamparados en Valencia es un obra maestra de la ingeniería estructural. En pocos meses y con una extraordinaria economía de material y medios auxiliares, se levantó una

delgada cáscara tabicada con una superficie de 530 m², con el modesto objetivo de servir de soporte a otra obra de arte: el gran fresco de Palomino.

La cúpula interior no cuelga de las barras de hierro que la conectan con la exterior. Es una cáscara auténtica proyectada y construida con seguridad e ingenio. La mitad superior funciona en estado de membrana a compresión y sus empujes se ven contrarrestados por los nervios de la cúpula exterior que actúan como las lengüetas y rellenos recomendados por Fray Lorenzo de San Nicolás en su tratado.

Los hierros sirvieron como guía durante la construcción y, también, dieron estabilidad a la delgada cáscara irregular hasta su cierre. Ciertamente, perdieron su utilidad al terminar la cúpula, pero constituyen un precioso testimonio del genial proceso constructivo empleado, y deben ser preservados.

La cúpula interior ha demostrado su seguridad durante 300 años. Esta seguridad se basa en una forma adecuada (a pesar de las irregularidades) y un contrarresto suficiente: la cúpula está eficazmente estribada por la cúpula exterior. Geometría correcta y contrarresto suficiente, equilibrio a compresión en definitiva, se cumplen a la perfección, y esta es la esencia de la arquitectura de fábrica.

NOTAS

1. La conclusión del equipo de Bosch de que los hierros eran tirantes de los que colgaba una falsa cúpula tuvo consecuencias sobre el enfoque de la restauración. Considerando que los hierros ya no estaban cumpliendo esta función, se propuso "colgar" de nuevo la cúpula, insertando 292 redondos de fibra aramídica. Los redondos se introducirían desde el exterior y se anclarían en la cúpula interior mediante una resina tipo Epoxi. Después, se tensarían, para asegurar efectivamente el colgado de la cúpula. Quien esto escribe recibió el encargo de la Generalitat Valenciana de escribir un informe sobre la estabilidad de la cúpula interior y de la pertinencia de intentar colgar la cúpula. En el citado informe (Huerta 2002) se mostraba el total desacuerdo

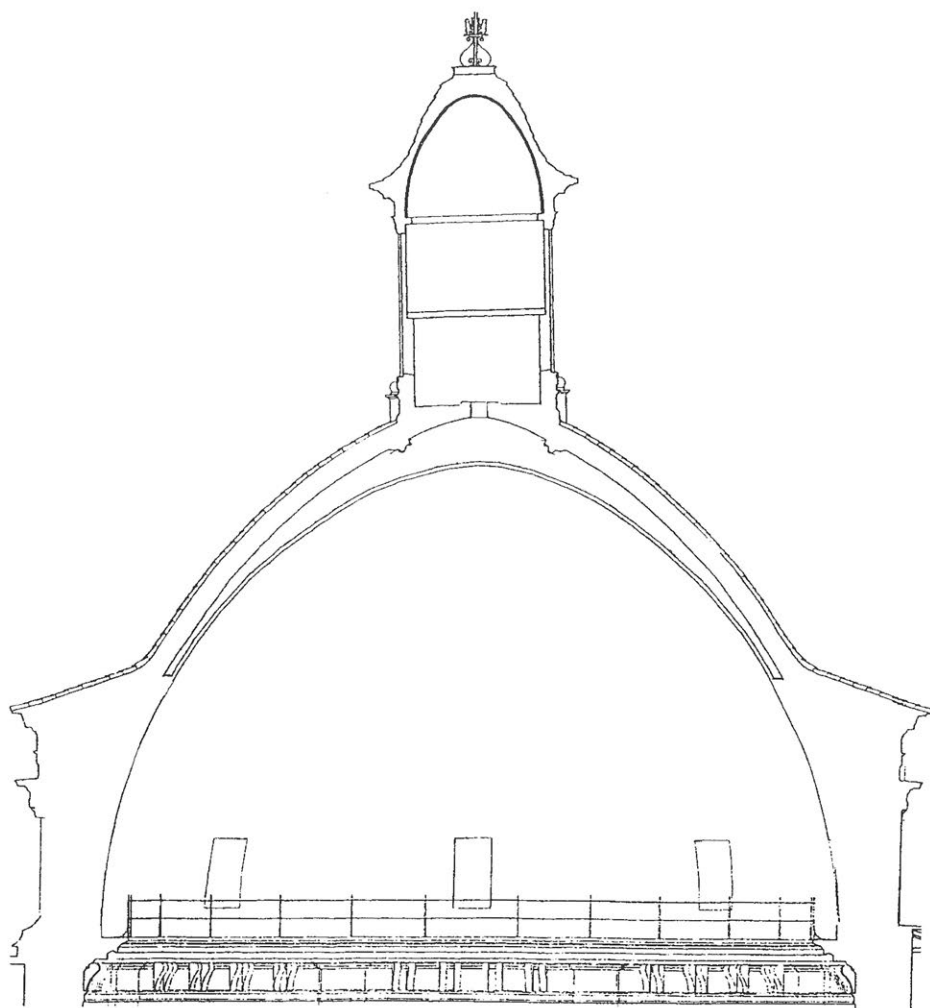


Figura 11 Sección dibujada para mostrar el sólido contrarresto que ofrece la cúpula exterior (dibujo del autor)

con la interpretación de la función de los nervios, así como con la intervención propuesta (Huerta 2003). El objetivo de este artículo no es reabrir un debate que se cerró al terminarse la restauración. Se trata de registrar y documentar la construcción

y comportamiento estructural de una obra maestra de la construcción abovedada, de la que, gracias al exhaustivo estudio de Bosch y su equipo, tenemos hoy un conocimiento detallado, inusual incluso en los más conocidos monumentos arquitectónicos.

2. El levantamiento fotogramétrico se realizó en los años 1990. Ignacio Bosch tuvo la amabilidad de hacerme llegar el archivo digital de la nube de puntos, como documentación suplementaria al informe de 2002; agradezco su generosidad. También querría agradecer a José Antonio García Ares y a Paula Fuentes su ayuda en el manejo de la información mediante el programa Rhinoceros, así como sus comentarios y sugerencias. El citado programa permite generar superficies que contengan la nube de puntos, para luego estudiar sus propiedades geométricas generales (volumen, superficie) y locales (radios de curvatura, curvatura gaussiana). La nube de puntos está incompleta en la parte inferior debido a la "sombra" que arroja la imposta al tomar medidas desde el suelo. No obstante, la forma de la cúpula tiene que ser concéntrica con la exterior en el arranque sobre la imposta, y no resulta difícil suponer con bastante aproximación un óvalo de base, que da una condición más para generar posibles superficies. La ayuda de José Antonio García Ares fue fundamental en esta etapa.

OBRAS CITADAS

- Almagro, A. 2001. Un aspecto constructivo de las bóvedas en Al-Andalus. *Al-Qantara. Revista de estudios árabes* (CSIC). 22: 147-170.
- Besenal, R. 1984. *Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien*. Paris : Editions Recherche sur les Civilisations,.
- Bosch Reig, I. 1999. El proyecto de restauración arquitectónica de las cúpulas, tambor y linterna de la Basílica de la Virgen de los Desamparados de Valencia. In *Restauración de pintura mural aplicada a la Basílica de la Virgen de los Desamparados de Valencia*, 1999-2000, edited by : P. Roig et al. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 21-74.
- Bosch Reig, I. 2006. *Intervención en el Patrimonio. Análisis tipológico y constructivo: El caso de la Basílica de los Desamparados de Valencia*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Bérchez, J. 1995. Basílica de Nuestra Señora de los Desamparados. In *Valencia. Arquitectura religiosa (Tomo X. Monumentos de la Comunidad Valenciana)* edited by J. Bérchez. Valencia: Generalitat Valenciana, 205-217.
- El-Naggar, S. 1999. *Les voûtes dans l'architecture de l'Égypte ancienne* Le Caire : Institut Français d'Archéologie Orientale.
- Heyman, J. 1977. *Equilibrium of Shell Structures*. Oxford : Clarendon Press.
- Heyman, J. 1982. *The Masonry Arch*. Chichester : Ellis Horwood.
- Heyman, J. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos* Ed. por S. Huerta. Madrid : Instituto Juan de Herrera.
- Heyman, J. 1995. *The Stone Skeleton. Structural Engineering of Masonry Architecture*. Cambridge: Cambridge University Press. (trad. esp. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid : Instituto Juan de Herrera / CEHOPU, 1999.)
- Heyman, J. 1998. Hooke's cubico-parabolical conoid. *Notes and Records of the Royal Society of London* 52: 39-50.
- Heyman, J. 2008. *Basic Structural Theory* Cambridge : Cambridge University Press. (trad. esp. *Teoría básica de estructuras* Madrid : Instituto Juan de Herrera, 2011.)
- Heyman, J. 2011. Cáscaras delgadas de fábrica. (Valencia, mayo de 2011, Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas.)
- Huerta, S. (ed.). 2001. *Las bóvedas de Guastavino en América*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Huerta, S. 2002. *Informe sobre la estabilidad de la cúpula interior de la Basílica de los Desamparados de Valencia*. Universidad Politécnica de Madrid. Technical Report P03-0315-078. (www.ad.upm.es)
- Huerta, S. 2003. The mechanics of timbrel vaults: a historical outline. In *Essays in the History of Mechanics*, edited by A. Becchi et al. Basel: Birkhäuser, 89-133.
- Huerta, S. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica* Madrid : Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, S. 2006. Structural Design in the Work of Gaudí. *Architectural Science Review* 49: 324-339.
- Huerta, S. 2007. Oval Domes: History, Geometry and Mechanics. *Nexus Network Journal. Architecture and Mathematics* 9: 211-248.
- Huerta, S. 2008. The Analysis of Masonry Architecture: A Historical Approach. *Architectural Science Review*, 51: 297-328.
- Huerta, S. et al. 2010. *Informe sobre la estabilidad de las bóvedas y el sistema de contrarresto de la nave y el crucero de la Iglesia de La Peregrina (convento de San Francisco) en Sahagún*. Uni-

- versidad Politécnica de Madrid. Technical Report P09-0315-796. (www.ad.upm.es)
- Huerta, S. and P. Fuentes. 2010. Analysis and demolition of some vaults of the church of La Peregrina in Sahagún (Spain). *Advanced Materials Research* 133–134: 343–348.
- Kubler, G. 1957. *Arquitectura de los Siglos XVII y XVIII. (Ars Hispaniae, vol.14)*. Madrid: Plus Ultra.
- Lotz, W. 1955. Die ovalen Kirchenräume des Cinquecento. *Römisches Jahrbuch für Kunstgeschichte* 7: 7-99.
- Marín Sánchez, R. 2011. Abovedamientos tabicados en las transformaciones interiores de las iglesias valencianas de finales del siglo XVII. (En esta misma publicación)
- Ochsendorf, J. 2010. *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*. New York: Princeton Architectural Press.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. 1983. Entre el manierismo y el barroco, iglesias españolas de planta ovalada. *Goya* 177: 98-107.
- Schubert, O. 1908. *Geschichte des Barock in Spanien*. Esslingen: Paul Neff Verlag.
- San Nicolás, Fray Lorenzo de. [1639]. *Arte y Uso de Arquitectura. Primera parte*. Madrid: s.d.
- Tomlow, J. 1989. *Das Modell. Antoni Gaudis Hängemodell und seine Rekonstruktion. Neue Erkenntnisse zum Entwurf für die Kirche der Colonia Güell*. Stuttgart : Institut für leichte Flächentragwerke. Universität Stuttgart.

Editores
Arturo Zaragoza
Rafael Soler
Rafael Marín

Construyendo Bóvedas Tabicadas

Actas del Simposio Internacional
sobre Bóvedas Tabicadas

Valencia 26, 27 y 28 de mayo de 2011

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Primera edición, 2012

© de la presente edición:

Editorial Universitat Politècnica de València
www.editorial.upv.es

© Editores:

Arturo Zaragoza
Rafael Soler
Rafael Marín

© de las fotografías: su autor

© diseño y maquetación:

Ramón París Peñaranda
Arturo Zaragoza Catalán

Imprime: Creaciones Fotocromo, S.L.

ISBN: 978-84-8363-872-9

Depósito Legal: V-1811-2012

Ref. editorial: 556

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Impreso en España

ÍNDICE

1. HISTORIA DE LAS BÓVEDAS TABICADAS

• Hacia una historia de las bóvedas tabicadas. ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo	11
• Bóvedas tabicadas en la Cartuja de Granada: el final de un proceso evolutivo. ALMAGRO GORBEA, Antonio	47
• Las bóvedas tabicadas en la arquitectura valenciana. GÓMEZ-FERRER LOZANO, Mercedes	61
• De la crucería al cortado: importación, implantación y desarrollo de la bóveda tabicada en Aragón y su decoración a lo largo de los siglos XVI y XVII. IBÁÑEZ FERNÁNDEZ, Javier	83
• “Volta de rajola”, “volta de maó pla” o “volta catalana”: reflexiones en torno a las bóvedas tabicadas en Cataluña durante los siglos del gótico. CONEJO DA PENA, Antonio	101
• Volte tabicadas nelle grandi isole del Mediterraneo: Sicilia e Sardegna (XV-XVIII secolo). BARES, Mercedes y NOBILE, Marco Rosario	119
• Guastavino y el eslabón perdido. VEGAS LÓPEZ-MANZANARES, Fernando y MILETO, Camilla	133
• Inventar un origen, renovar una tradición. La obra de Guastavino Co.: Aspiraciones espirituales y bendito mercado americano. LOREN MÉNDEZ, Mar	157

2. CONSTRUCCIÓN DE LAS BÓVEDAS TABICADAS

• Navegando por el trasdós de las cúpulas tabicadas: tipos constructivos y noticia de artefactos contruidos. SOLER VERDÚ, Rafael y SOLER ESTRELA, Alba	177
• Abovedamientos tabicados en las transformaciones interiores de las iglesias valencianas de finales del siglo XVIII. MARÍN SÁNCHEZ, Rafael	205
• Las razones del uso masivo de la bóveda tabicada en el Hospital de Sant Pau de Barcelona: una hipótesis para el debate CASALS, Albert; GONZÁLEZ, José Luis; ONECHA, Belén, SANMARTÍ, Claudia	225

• Ignasi Bosch i Reitg (1910-1985): una patente para construir bóvedas tabicadas. CHAMORRO TRENADO, Miquel Àngel; LLORENS SULIVERA, Joan y LLORENS SULIVERA, Miquel	239
• A uso y costumbre de buen oficial: sobre construcción y ruina de bóvedas tabicadas en la Valencia de los siglos XVII y XVIII. GIL SAURA, Yolanda	249
• Estabilidad de la construcción sin cimbra. FORTEA LUNA, Manuel y PEDRERA ZAMORANO, José Luís	263
• La construcción tabicada hoy. MARTÍN JIMÉNEZ, Carlos y GARCÍA MUÑOZ, Julián	275
• Bóvedas tabicadas reloaded: una propuesta evolutiva desde Mallorca. RAMIS GONZÁLEZ, Miquel	285

3. MECÁNICA ESTRUCTURAL

• Cáscaras delgadas de fábrica. HEYMAN, Jacques	295
• Nuevas bóvedas tabicadas: análisis, diseño y construcción. OCHSENDORF, John	309
• Análisis estructural de cúpulas tabicadas: la cúpula interior de la Basílica de la Virgen de los Desamparados en Valencia. HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago	319
• La comprensión de la tracción. ALONSO DURÀ, Adolfo y MARTÍNEZ BOQUERA, Arturo	337
• El análisis experimental aplicado a bóvedas tabicadas. LLORENS SULLIVERA, Miquel, LLORENS SULLIVERA, Joan y CHAMORRO TRENADO, Miquel Àngel	349

4. DESARROLLO DEL SIMPOSIO

• Programa	365
• Ceremonia de apertura	369
• Ceremonia de clausura	383
• Algunos de los paneles presentados en el Simposio	387
• Índice de autores	391